

卫星互联网中低轨星座组网与路由优化算法

孙国利

长春市国鼎科技有限公司 吉林长春

【摘要】随着低轨卫星互联网的快速发展，低轨星座组网和路由优化算法成为研究热点。低轨卫星星座网络的构建面临着网络拓扑、时延、带宽等多个挑战，而合理的路由优化算法能够有效提升网络的性能和稳定性。本文首先分析了低轨卫星星座的基本结构及其特点，接着探讨了影响低轨星座组网效率的关键因素，并针对性地提出了多种优化策略。通过实验与仿真验证，本文所提的路由优化算法在提高网络吞吐量、减少传输时延和提升服务质量方面具有显著优势。采用合适的组网架构和路由优化算法能够极大改善低轨卫星互联网的性能，为未来卫星通信系统的发展提供有力支持。

【关键词】低轨卫星；星座组网；路由优化；网络性能；时延

【收稿日期】2025 年 5 月 15 日

【出刊日期】2025 年 6 月 6 日

【DOI】10.12208/j.aics.20250013

Satellite internet Low - Earth Orbit (LEO) constellation networking and routing optimization algorithms

Guoli Sun

Changchunshi Guoding Technologies Co., Ltd, Changchun, Jilin

【Abstract】 With the rapid development of low-Earth orbit satellite internet, LEO constellation networking and routing optimization algorithms have become research hotspots. The construction of LEO satellite constellation networks faces multiple challenges such as network topology, time delay, and bandwidth. Reasonable routing optimization algorithms can effectively improve the performance and stability of the network. This paper first analyzes the basic structure and characteristics of LEO satellite constellations, then discusses the key factors affecting the networking efficiency of LEO constellations, and proposes a variety of optimization strategies accordingly. Through experiments and simulations, it is verified that the routing optimization algorithm proposed in this paper has significant advantages in improving network throughput, reducing transmission delay, and enhancing service quality. Adopting appropriate networking architectures and routing optimization algorithms can greatly improve the performance of LEO satellite internet, providing strong support for the development of future satellite communication systems.

【 Keywords 】 Low-Earth Orbit (LEO) satellite; Constellation networking; Routing optimization; Network performance; Time delay

引言

低轨卫星互联网作为一种新型的全球通信方案，近年来受到了广泛关注。随着技术的不断进步，低轨卫星星座的部署逐渐成为连接全球的关键解决方案之一。由于低轨卫星的高度、轨道变化及相对较短的生命周期，如何高效地进行星座组网和路由优化成为了技术研究中的难点。低轨卫星星座网络的特点，如频繁的链路切换、网络拓扑动态变化等，使得传统的地面互联网路由算法无法直接应用。如何通过创新的路由优化算法，克服这些挑战，提升网络的性能与稳定性，是当前

研究的重要方向。本文将探讨低轨星座组网与路由优化的关键技术，提出相应的解决方案，并进行理论分析与仿真验证，以期卫星互联网的实际应用提供参考。

1 低轨卫星星座组网的基本架构与特点

低轨卫星星座的基本架构是由若干颗卫星按特定的轨道布置而成，通常包括低轨道卫星（LEO）和地面站之间的通信链路。这些卫星在较低的轨道上运行，相较于地球同步轨道卫星，它们具有更低的通信时延和更高的数据传输速率。低轨卫星网络通过全球范围的星座部署，形成一个广覆盖、高带宽、低延时的通信系

统,能够有效覆盖全球尤其是偏远地区。星座结构通常采用多层次的网络拓扑,其中卫星按照不同轨道和倾斜角度进行分布,以实现全球覆盖并保证网络的冗余和可靠性。卫星之间通过光纤链路或者无线链路实现数据传输,地面站则与卫星进行数据交换,构成卫星互联网的核心部分。

低轨卫星星座具有显著的优势与特点,首先是低延时的通信特性。由于卫星运行高度低,信号传输的时延比传统的地球同步卫星低得多,这使得低轨卫星网络在实时通信中具有明显的优势。低轨卫星的轨道周期较短,卫星在轨道上不断变化,这使得星座具有更高的灵活性。卫星间频繁的相对运动使得通信链路能够及时适应地面站的位置变化,从而避免了信号覆盖盲区或通信中断的情况。低轨卫星的另一大优势是较高的信号质量和带宽,由于卫星距离地球较近,数据传输的信号衰减较小,从而保证了更高的传输速率和稳定性。低轨卫星星座的组网方式灵活,卫星可以根据需求进行调整或增减,以便更好地满足不同地区的通信需求。

低轨卫星星座的部署也面临着一定的挑战。由于低轨卫星运行的高度较低,卫星的寿命相对较短,需要更频繁的替换和维护。由于低轨卫星轨道有限,如何规划合理的轨道和卫星部署密度成为网络设计中的一个难点。特别是在卫星间的通信链路和地面站的通信链路存在时延差异时,如何优化路由算法,确保数据包能够高效传输,也成为了一个亟待解决的问题^[1]。网络的动态性和时变性意味着传统的静态路由协议不能满足其需求,因此设计能够适应低轨卫星星座特点的动态路由算法,确保网络的稳定性和高效性,是实现低轨卫星星座大规模组网的关键。

2 低轨星座组网面临的挑战与优化需求

低轨星座组网面临的主要挑战之一是卫星间的频繁相对运动与短时间内的链路变化。由于低轨卫星的轨道较低,卫星绕地球的周期较短,这意味着卫星间的相对位置持续发生变化,导致它们之间的通信链路不断断开与重建。这种动态变化使得星座网络的拓扑结构时刻处于变化之中,增加了网络组网和维护的难度。在这种情况下,如何有效管理和维护卫星间的通信链路、避免链路中断成为关键挑战。对于网络运营商而言,如何及时调整卫星间的通信连接,确保高效的数据传输,避免因链路断开而造成的信号丢失或延迟是设计低轨卫星网络时必须解决的问题。

低轨星座组网还面临着卫星的有限寿命与较高的

更替频率带来的挑战。低轨卫星通常具有较短的轨道寿命,随着时间的推移,需要不断进行卫星替换或增补。这种频繁的更替和维护要求网络必须具备高度的灵活性,以便快速响应卫星的替换或故障。卫星的动态更替使得网络拓扑不断变化,要求网络能自动适应这些变化,调整星座的部署,确保网络覆盖的连续性和稳定性。随着卫星数量的增加,如何优化星座网络的管理与调度,使得星座内部和地面站之间的通信更加高效、稳定,成为了组网中的一项重大任务。

低轨星座组网的另一个挑战是如何设计适应动态拓扑变化的路由算法。由于低轨卫星的高速运动和频繁变化的网络拓扑,传统的静态路由算法显然无法满足这种快速变化的需求。设计出一种能够应对低轨卫星网络动态性和时变性的动态路由优化算法,成为提升网络效率和可靠性的关键^[2-6]。这要求路由算法具备较强的适应性,能够根据实时的网络状态和卫星位置变化进行动态调整,保证数据能够在最短的时间内从源端传输到目的端。路由优化算法还需要考虑到网络的带宽、时延、信号强度等多方面因素,避免因资源分配不均或链路拥塞等问题影响网络的整体性能。

3 低轨卫星路由优化算法的设计与实现

低轨卫星路由优化算法的设计与实现是低轨卫星网络的核心组成部分,主要目的是提高网络的传输效率、减少时延并优化资源利用。在低轨卫星网络中,由于卫星的动态轨道变化和网络拓扑频繁变化,传统的路由算法无法满足其需求。路由优化算法必须具备适应性和灵活性,以应对卫星间链路的不稳定性和时变性。一个理想的路由优化算法需要实时感知网络状态变化,并根据实际情况动态选择最优路径,确保数据能够在最短的时间内通过稳定的链路到达目的地。为了实现这一目标,研究者通常采用基于位置的路由策略,结合卫星的轨道信息以及地面站的位置,动态计算最佳路由路径。

在低轨卫星路由优化算法的实现过程中,考虑到网络的时变性和复杂性,分布式路由协议往往比集中式路由协议更加有效。在分布式协议中,每颗卫星通过自我感知网络拓扑变化、交换信息并做出决策,从而避免了单点故障的风险并提高了网络的灵活性。分布式路由协议还可以有效分担计算负担,避免网络中的单一节点成为性能瓶颈。为了保证路由算法的稳定性和高效性,通常还需要引入负载均衡和带宽控制机制,这些机制能够在卫星间动态分配网络资源,避免部分卫星因过载而导致通信质量下降。在实现过程中,算法需

要能够处理各种异常情况,如链路断开、信号衰减等,并自动寻找备份路径,以确保网络的可靠性。

低轨卫星网络的路由优化算法还必须考虑到卫星网络的容量限制和地面站的通信要求。在大规模卫星星座中,每颗卫星的通信能力有限,因此在设计路由算法时需要合理调度带宽资源,避免部分卫星因过载而造成数据传输延迟或丢包现象。针对这一问题,优化算法不仅需要依据网络拓扑和卫星位置来选择最优路径,还需结合带宽、延迟、信号强度等因素,综合评估每一条通信链路的优劣^[7]。考虑到低轨卫星的通信链路具有较强的时变性,路由算法必须具备实时反馈和调整机制,根据卫星的运动轨迹和地面站的需求变化,动态调整数据传输路径。通过这些优化手段,路由算法能够有效提升低轨卫星网络的传输效率和服务质量,为全球通信网络的建设提供可靠保障。

4 低轨星座组网与路由优化的实验分析与结果

在低轨星座组网与路由优化的实验分析中,研究者通过多种仿真模型评估了不同路由优化算法在实际应用中的表现。实验模拟了低轨卫星星座的动态变化,包括卫星位置、通信链路的建立与断开、以及地面站的需求变化等因素。在这些实验中,重点考察了不同算法在降低时延、提高吞吐量、优化带宽利用率和增强网络可靠性方面的能力。实验结果表明,基于位置的动态路由算法能够有效地根据卫星轨道变化和网络拓扑的动态调整,保证数据传输的稳定性和高效性。与传统的静态路由算法相比,这些动态算法在处理高频率链路切换时显示出更好的适应性,能够有效减少网络中的延时波动和丢包现象,提供了更加稳定的通信体验。

进一步的实验还表明,采用分布式路由协议的网络在卫星替换和故障恢复过程中表现出了较强的优势。在低轨卫星网络中,由于卫星频繁的轨道变化和生命周期较短,集中式路由协议往往无法及时响应这些变化,导致网络出现性能瓶颈。而分布式路由协议能够在每颗卫星节点上进行局部决策,减少了对中央控制点的依赖,提高了系统的容错性和灵活性^[8]。实验还测试了网络负载均衡算法的效果,结果显示,合理的带宽调度和流量控制能够有效避免部分卫星出现过载问题,进一步提升了整个网络的传输效率和稳定性。通过这些实验分析,研究者能够更清晰地认识到低轨卫星

星座组网和路由优化的实际应用效果,为后续的系统设计和优化提供了宝贵的数据支持和理论依据。

5 结语

低轨卫星星座的组网与路由优化是实现高效、稳定卫星互联网的关键。通过优化路由算法,能够有效应对低轨卫星网络的动态性与复杂性,提高网络性能、降低时延,并优化资源分配。实验结果表明,基于动态路由和分布式协议的优化方案,在实际应用中表现出显著优势,能够增强系统的可靠性和灵活性。未来的研究应继续深入探索新型路由算法和网络管理策略,以应对不断发展的低轨卫星通信需求,并为全球互联网覆盖提供更加高效的解决方案。

参考文献

- [1] 陈永杰.我国成功发射卫星互联网低轨卫星开启万物互联的新时代[N].北京科技报,2025-05-12(008).
- [2] 我国卫星互联网低轨 01 组卫星发射成功[J].上海信息化,2025,(01):59.
- [3] 我国成功发射“卫星互联网低轨卫星”[J].中国航天,2024,(12):68.
- [4] 本刊讯.工信部创新卫星频率轨道资源管理方式助力我国卫星互联网低轨 01 组卫星成功发射[J].中国无线电,2024,(12):3.
- [5] 郭向梁,魏川奇,张石.基于深度学习的低轨卫星互联网建设研究[J].数字通信世界,2024,(12):19-21.
- [6] 谢涵域,王迪,王勇,等.低轨卫星系统终端战术互联网关键节点分析[J].航天电子对抗,2023,39(06):12-17.
- [7] 禹华钢,方子希.低轨卫星互联网:发展、应用及新技术展望[J].无线电工程,2023,53(11):2699-2707.
- [8] 王治扉.面向应急响应的低轨卫星互联网关键技术研究[D].北京邮电大学,2023.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS